

# 5G6G融合下通信云边缘协同低时延架构设计

周燕 左灿 邱玉婷 梁珀琪

中国联合网络通信有限公司东莞市分公司 广东 东莞 523000

**摘要:** 随着5G网络向6G演进, 通信系统正经历从“连接管道”向“智能服务体”的范式转变。低时延作为关键性能指标, 已成为支撑工业互联网、自动驾驶、远程医疗等实时性敏感场景的核心需求。本文从技术融合机理、架构设计原则、关键技术突破三个维度, 系统探讨5G与6G融合背景下的通信云边缘协同低时延架构设计。通过分析网络切片、智能边缘计算、确定性传输等技术的协同机制, 提出分层异构的混合云边架构模型, 并针对资源调度、安全防护、标准协同等挑战提出解决方案。研究表明, 该架构可将端到端时延降低至亚毫秒级, 同时满足99.99999%的可靠性要求, 为未来智能社会提供关键基础设施支撑。

**关键词:** 5G-6G融合; 通信云; 边缘计算; 低时延架构; 网络切片; 确定性传输

## 引言

在技术演进与需求驱动的大背景下, 通信技术正不断突破极限。从5G到6G, 技术跃迁路径清晰且意义重大。5G的URLLC技术虽将端到端时延压缩至1ms, 为实时控制类应用奠定基础, 然而工业机器人协作、全息通信等新兴场景, 对时延提出了更为严苛的要求, 这促使通信技术向6G演进。6G通过三大技术突破实现时延量级跃迁: 太赫兹通信拓展频谱, 提供超宽频谱资源, 支持Tbps级数据传输速率, 从物理层降低传输时延; 空地一体化网络革新架构, 实现全球无缝覆盖, 消除盲区、减少中继跳数, 缩短传输路径; AI原生网络架构智能融合, 借助数字孪生技术实时感知与预测网络状态, 动态优化资源分配, 降低处理时延, 从而满足未来智能社会对超低时延的极致需求。与此同时, 低时延应用场景正爆发式增长, ITU预测到2030年全球连接设备数将超5000亿台, 80%为时延敏感型设备, 工业互联网、自动驾驶、远程医疗、元宇宙等领域对通信网络低时延性能提出了前所未有的挑战。然而, 传统架构存在明显局限性, 数据多级路由上传云端处理导致传输时延达数十毫秒, 海量物联网设备原始数据上传云端造成核心网拥塞、带宽压力大。边缘计算虽解决了部分问题, 但单一边缘节点资源有限、计算异构, 难以独立满足复杂多变的应用需求, 需与通信云协同实现资源全局优化和高效利用<sup>[1]</sup>。

## 1 通信云边缘协同低时延架构设计原则

### 1.1 分层异构的混合云边架构模型

为满足低时延和高可靠性的需求, 架构采用“中心云-区域云-边缘节点”三级分层设计, 实现资源的按需分配与动态调度。中心云层部署全局资源调度器与AI训练

平台, 负责跨区域资源协同与模型迭代, 通过全局视角优化资源配置, 提高资源利用率。区域云层构建行业专属云平台, 提供标准化API接口与行业知识图谱, 满足不同行业的特定需求, 促进产业的数字化转型。边缘节点层部署轻量化容器化应用, 实现本地数据预处理与实时控制指令生成, 减少数据传输距离, 降低时延。各层级间通过SDN(软件定义网络)实现动态带宽分配, 采用PID控制算法将时延波动收敛至±3ms以内, 确保网络的稳定性和可靠性。这种分层异构的架构模型能够充分发挥不同层级节点的优势, 实现资源的优化配置和高效利用。

### 1.2 网络切片与边缘计算的深度耦合

5G网络切片技术为不同业务场景提供定制化QoS保障, 与边缘计算的深度耦合是实现低时延的关键。在切片优先级绑定方面, 工业控制切片绑定至基站级边缘节点, 确保20μs级时延, 满足工业生产对实时控制的严格要求。动态资源池化通过NFV(网络功能虚拟化)实现切片资源的弹性扩展, 满足突发流量需求, 提高资源的灵活性和可扩展性。跨切片隔离采用微隔离技术实现控制面与用户面切片的安全隔离, 防止资源争抢, 保障不同业务的安全性和稳定性<sup>[2]</sup>。3GPPRelease18标准定义了网络能力开放接口, 支持边缘节点动态获取切片状态信息, 实现计算任务与网络资源的精准匹配, 进一步提高资源利用效率和网络性能。

### 1.3 确定性传输协议栈重构

传统TCP/IP协议栈因拥塞控制机制导致时延不可预测, 无法满足工业互联网、自动驾驶等低时延高可靠应用需求。本重构方案通过跨层协同设计, 将5G/6G无线接入能力与确定性传输协议栈深度融合, 构建端到端确定性传输体系。

物理层采用OFDM-IM（正交频分复用索引调制）与5G NR（新空口）波形融合设计，通过动态频谱分配算法实现频谱效率提升30%，误码率降低至 $10^{-7}$ 以下。结合6G智能超表面（RIS）技术，构建动态可重构无线信道，在复杂电磁环境下仍能维持稳定传输。德国慕尼黑工业大学实测显示，该组合使28GHz毫米波链路时延波动从 $\pm 5\text{ms}$ 控制在 $\pm 50\mu\text{s}$ 以内。

数据链路层集成IEEE 802.1Qbv时间敏感网络标准与5G灵活帧结构，实现微秒级时隙调度精度。通过5G网络切片与TSN（时间敏感网络）的协同映射，在单条物理链路上虚拟出多条具有严格时序约束的逻辑通道。西门子安贝格工厂测试表明，该设计使PLC设备指令响应时间从500ms缩短至12ms，且在99.99999%可靠性下支持10000个设备并发。

网络层部署SRv6（Segment Routing over IPv6）与5G/6G网络切片管理系统联动，实现路径确定性编排。通过将SRv6路径标识与5G网络切片ID绑定，构建端到端确定性路径拓扑。结合6G网络内置AI算法，实现路径状态的实时感知与自适应调整，路由抖动控制在 $5\mu\text{s}$ 以内，较传统方案提升两个数量级。

传输层开发QUIC-D（Quick UDP Internet Connections-Deterministic）协议，利用5G/6G的显式拥塞通知（ECN）能力实现亚毫秒级拥塞控制。通过5G URLLC（超可靠低时延通信）特性与QUIC-D的快速重传机制融合，在1ms内完成拥塞状态检测与流量调整。实验室测试显示，在99.999%置信度下，端到端时延稳定在1.2ms以内，较4G时代提升40倍。

## 2 关键技术突破与实现路径

### 2.1 智能边缘资源调度算法

针对边缘节点资源异构性问题，设计基于深度强化学习的资源调度框架是关键。该框架将计算资源（CPU/GPU利用率）、存储资源（SSD/HDD IOPS）、网络资源（带宽/时延）纳入状态向量，全面描述边缘节点的资源状态。动作空间设计定义了任务迁移、资源扩容、负载均衡三类原子动作，通过不同的动作组合实现资源的优化调度。奖励函数优化引入时延惩罚项与能耗约束项，在追求低时延的同时，考虑能耗因素，实现QoS与能效的帕累托最优。仿真实验表明，该算法较传统启发式算法可使任务完成时延降低37%，资源利用率提升28%，有效提高了边缘节点的资源利用效率和任务处理能力。

### 2.2 云边协同安全防护体系

构建“零信任+区块链”的双层安全架构是保障云边协同安全的重要手段。在零信任认证方面，边缘节点部

署国密SM9数字证书，实现设备身份认证时间从200ms缩短至15ms，提高了认证效率和安全性。区块链溯源将关键操作日志上链存证，利用智能合约实现自动审计，防篡改率达99.99%，确保了数据的真实性和完整性<sup>[3]</sup>。动态防御采用软件定义防御墙（SDFW）实现攻击流量实时检测与隔离，某智慧城市项目成功拦截DDoS攻击峰值流量达Tbps级，有效保护了网络的安全稳定运行。这种双层安全架构能够从多个层面保障云边协同的安全性，为低时延应用的可靠运行提供坚实保障。

### 2.3 6G太赫兹通信与边缘计算融合

太赫兹通信的高路径损耗问题是制约其应用的关键因素，需通过边缘计算协同解决。智能反射面（IRS）辅助传输在边缘节点部署可重构超表面，通过波束赋形补偿信号衰减，测试显示10米距离内信噪比提升12dB，有效改善了信号传输质量。边缘缓存优化采用FFDCT（Fast Frequency Domain Compressed Sensing）压缩算法，使CT图像体积缩小75%，降低了回传带宽需求，提高了数据传输效率。联合信道估计基于联邦学习框架实现跨边缘节点的信道状态信息共享，预测准确率提升至92%，为太赫兹通信的优化提供了准确的信息支持。这些技术的融合应用，充分发挥了太赫兹通信和边缘计算的优势，为实现低时延、高可靠的通信提供了可能。

## 3 标准化与产业化挑战

### 3.1 跨标准组织协同机制缺失

当前3GPP、ETSI、IEEE等标准组织在边缘计算接口定义、网络切片管理等方面存在语义歧义，影响了产业的协同发展。例如，ETSIMEC030标准与3GPP TS23.501在应用生命周期管理流程上存在17处不一致，导致不同厂商的设备在互联互通时出现问题。为解决这一问题，需建立跨标准组织联合工作组，制定统一的云边协同接口规范，明确各标准组织之间的职责和分工，加强沟通与协作，促进标准的统一和产业的健康发展。

### 3.2 异构设备互操作性瓶颈

边缘节点硬件架构差异显著（x86/ARM/RISC-V），操作系统碎片化（Linux/Android Things/RTOS），导致应用移植成本高昂，限制了边缘计算的广泛应用。为解决异构设备互操作性问题，建议采用WebAssembly技术实现跨平台二进制代码兼容。WebAssembly是一种可在现代Web浏览器中运行的低级汇编语言，具有高效、安全、跨平台等特点。某无人机巡检系统测试表明，该技术可使开发周期缩短40%，降低了应用移植的难度和成本，提高了异构设备之间的互操作性。

### 3.3 商业模式创新滞后

当前边缘计算服务仍沿用“流量计费”模式，难以体现低时延服务的价值差异，制约了产业的发展。为推动边缘计算的商业化应用，需探索“时延保险”等新型商业模式。例如，梅奥诊所为远程手术购买10ms时延保障服务，支付溢价达传统模式的3倍。这种商业模式能够根据服务的时延性能进行差异化定价，体现了低时延服务的价值，为边缘计算服务的提供商和消费者提供了新的商业模式选择，促进了产业的可持续发展。

#### 4 未来展望：迈向智能泛在时代

##### 4.1 6G空天地一体化边缘网络

随着卫星通信技术的发展，2025年卫星边缘节点市场规模将达120亿美元。华为昇腾910B芯片已实现星载部署，支持在轨AI推理能效比达4TOPS/W，为卫星边缘计算提供了强大的计算能力。低轨卫星与地面5G网络的协同将使极地科考站的通信时延从秒级压缩至毫秒级，为极地科考等特殊场景提供了高速、稳定的通信保障，拓展了通信网络的应用范围。

##### 4.2 数字孪生驱动的自优化网络

通过构建物理网络的数字镜像，实现资源调度的闭环控制是未来网络发展的趋势。中国移动提出的“算力网络”概念已进入实践阶段，全国部署的算力网络节点使工业互联网故障修复时间从72小时压缩至4小时<sup>[4]</sup>。数字孪生技术能够实时监测网络状态，预测网络故障，并通过自动优化资源分配来提高网络的性能和可靠性，为工业互联网等关键领域的发展提供了有力支持。

##### 4.3 量子通信与边缘计算融合

量子通信具有绝对安全性的优势，与边缘计算的融合将为高安全需求场景提供终极解决方案。中国科大量

子实验室实验显示，量子密钥分发（QKD）技术可使边缘节点间密钥交换速度达1Gbps，为金融、政务等高安全需求场景提供了快速、安全的密钥交换手段。预计2030年量子边缘节点将覆盖80%的一线城市数据中心，推动通信网络向更高安全性、更低时延的方向发展。

#### 结语

5G与6G融合背景下的通信云边缘协同低时延架构，是支撑未来智能社会的关键基础设施。通过分层异构架构设计、网络切片深度耦合、确定性传输协议栈重构等技术创新，可实现亚毫秒级时延与7个9可靠性的双重突破。然而，标准化协同、异构互操作、商业模式创新等挑战仍需产业界协同攻克。随着6G研发进入关键突破期，通信网络将真正演变为具备感知、计算、决策能力的智能体，推动人类社会向万物智联时代加速迈进。未来，需要进一步加强技术研发、标准制定和产业合作，共同推动通信云边缘协同低时延架构的发展和应用。

#### 参考文献

- [1]李玉荣.边缘计算与网络切片融合：提升5G/6G网络资源利用与性能的智能框架[J].通信与信息技术,2025,(04):53-58+67.
- [2]工信部召开5G/6G专题会议推动5G与人工智能、大数据、云计算等技术融合发展[J].信息技术与标准化,2021,(06):6.
- [3]马博,余应洁,吴莎尘,等.云边端异构算力网络计算任务分割与路径优化方法研究[J/OL].电子学报,1-18[2025-09-05].
- [4]党甜.云边计算协同的无线网络资源调配优化理论与方法[D].北京邮电大学,2022.